

【書類名】 特許願  
【整理番号】 000000298  
【提出日】 平成 14 年 7 月 4 日  
【あて先】 特許庁長官 及川 耕造 殿  
【国際特許分類】 G06F 17/50  
【発明者】  
    【住所又は居所】 神奈川県横浜市港北区日吉 3 丁目 1 4 - 1 慶應義塾大  
                        学理工学部内  
    【氏名】 棚橋 ▲隆▼彦  
【発明者】  
    【住所又は居所】 神奈川県横浜市港北区日吉 3 丁目 1 4 - 1 慶應義塾大  
                        学理工学部内  
    【氏名】 神保 智彦  
【特許出願人】  
    【識別番号】 899000079  
    【氏名又は名称】 学校法人 慶應義塾  
【代理人】  
    【識別番号】 100099254  
    【弁理士】  
    【氏名又は名称】 役 昌明  
【選任した代理人】  
    【識別番号】 100100918  
    【弁理士】  
    【氏名又は名称】 大橋 公治  
【選任した代理人】  
    【識別番号】 100105485  
    【弁理士】  
    【氏名又は名称】 平野 雅典  
【選任した代理人】  
    【識別番号】 100108729  
    【弁理士】  
    【氏名又は名称】 林 紘樹  
【手数料の表示】  
    【予納台帳番号】 037419  
    【納付金額】 21,000 円  
【提出物件の目録】  
    【物件名】 明細書 1  
    【物件名】 図面 1  
    【物件名】 要約書 1  
【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 混合格子型解適合格子法を用いた数値解析装置

【特許請求の範囲】

【請求項1】 有限体積法により混合格子型解適合格子法を用いて数値解析を行う数値解析装置において、四面体セルと六面体セルと五面体セルの自由な組み合わせを用いて作成された初期格子データを格納する初期格子記憶手段と、セルの三角形の面を複数の三角形に、四角形の面を複数の四角形に分割するように、セルを複数のセルに分割する格子分割手段と、セルを削除して分割前のセルに戻す格子削除手段とを具備することを特徴とする数値解析装置。

【請求項2】 前記格子分割手段は、分割閾値を保持する分割閾値記憶手段と、削除閾値を保持する削除閾値記憶手段と、セルごとに密度に基づいて分割削除指針値を計算する手段と、セルの体積が最小値よりも大きくてセルの分割レベルが最大でなくて前記分割削除指針値が前記分割閾値よりも大きければセルを分割するように決定する分割判定手段と、セルの分割レベルが零の初期格子でなくて、前記分割削除指針値が前記削除閾値よりも小さければセルを削除するように決定する削除判定手段とを備えることを特徴とする請求項1記載の数値解析装置。

【請求項3】 前記格子分割手段は、三角柱セルを8個の三角柱セルに分割する手段と、六面体セルを8個の六面体セルに分割する手段と、四角錐セルを6個の四角錐セルと4個の四面体セルに分割する手段と、四面体セルを8個の四面体セルに分割する手段と、四面体セルを4個の四面体セルと2個の四角錐セルに分割する手段とを備えることを特徴とする請求項1記載の数値解析装置。

【請求項4】 有限体積法により混合格子型解適合格子法を用いて数値解析を行う数値解析方法において、四面体セルと六面体セルと五面体セルとを用いて作成された初期格子データに基づいて有限体積法により流体の密度を含む物理量を計算し、計算結果の密度に基づいてセルごとに分割削除指針値を計算し、セルの体積が最小値よりも大きくてセルの分割レベルが最大でなくて前記分割削除指針値が分割閾値よりも大きければ、セルの三角形の面を複数の三角形に、四角形の面を複数の四角形に分割するように、セルを複数のセルに分割し、セルの分割レベルが零の初期格子でなくて、前記分割削除指針値が削除閾値よりも小さければ、セルを削除して分割前のセルに戻して、次の格子を生成し、この格子データに基づいて有限体積法により流体の密度を含む物理量を計算することを繰り返すことを特徴とする数値解析方法。

【請求項5】 セルを分割する場合は、三角柱セルは8個の三角柱セルに分割し、六面体セルは8個の六面体セルに分割し、四角錐セルは6個の四角錐セルと4個の四面体セルに分割し、四面体セルは8個の四面体セルに分割するか、4個の四面体セルと2個の四角錐セルに分割することを特徴とする請求項4記載の数値解析方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、混合格子型解適合格子法を用いた数値解析装置に関し、特に、格子セル境界面の三角形を三角形に分割し、四角形を四角形に分割する混合格子型解適合格子法を用いて有限体積法により計算する数値解析装置に関する。

#### 【0002】

##### 【従来の技術】

従来の数値解析装置で、衝撃波が発生するような圧縮性流体の解析を行う場合、Mach 数がある程度以上になると、物理量の急激な変化を計算する必要がある。

物理量が急激に変化する部分を高精度に計算するためには、相当数のセルからなる計算用の格子が必要となる。しかし、解析領域全体に一樣に細かい格子を構成してしまうと、メモリを多量に消費することとなり、不経済である。メモリを節約するために、問題に適合した格子を用いると汎用性が無くなる。汎用性とメモリの有効利用は、解析手法を構築する上で重要な点である。

#### 【0003】

汎用性を高めるためには、単純な形状から複雑な形状まで、様々な解析対象に容易に適用できる形状適合性の高さが必要である。二次元では、三角形を解析格子として用いると、形状適合性がよい。三次元では、四面体セルと六面体セルを用いる。格子形状自由度の面では、四面体セルの格子が優れている。三次元では、四面体格子を解析格子として用いると、形状適合性がよい。しかし、計算効率の面では、六面体セルの格子の方が優れている。つまり、複雑形状問題では、解析領域に可能な限り六面体セルの格子を用い、格子生成が困難な箇所のみ四面体セルの格子を用いて解析を行うのが最も効率がよい。三角形格子及び四面体格子は、解析領域において格子の疎密制御が比較的容易である。解析対象が複雑な形状であっても、解析領域に高品質な格子を短時間で生成できるため、これらを解析格子とすることで、汎用性をよくすることができる。

#### 【0004】

メモリを節約するためには、物理量の変化の激しい部分だけ格子を細かくする。定常解析では、衝撃波の発生する位置を前もって予測して、その部分にだけ細かい解析格子を配置すればよい。しかし、非定常解析では、衝撃波などの不連続部が変化するため、その時々に応じて、解析格子自体を配置換えする必要がある。そこで、非定常な衝撃波の解析においては、計算メモリの有効利用のために、解適合格子法(AMR: Adaptive Mesh Refinement)を用いる。衝撃波のように物理量の変化の激しい部分を、時間進行に従って検出し、セルの分割・結合を行いながら、変化の急な部分にのみ、より小さいセルを集中させる。こうすることにより、必要最小限の計算メモリで高精度な解析を行うことができる。

#### 【0005】

解適合格子法としては、変化が急激な部分の補間関数を高次にする p 法と、そのような部分にセルを寄せる r 法と、そのような部分のセルを細分化する h 法がある。衝撃波解析のように不連続部分を取り扱う場合には、セルの細分化を行う h 法が最も効果的である。h 法の解適合格子法は、セルを細分化するだけでなく、不要な部分のセルを初期の大きいセルに戻すことで、最小限の計算メモリで高

精度な解析が行える。

#### 【0006】

##### 【発明が解決しようとする課題】

しかし、上記従来の数値解析方法では、四面体セルの格子と六面体セルの格子をつなぐ格子が複雑になり、計算効率が悪いという問題があった。

#### 【0007】

本発明は、上記従来の問題を解決して、混合格子型解適合格子法を用いて数値解析を行う数値解析装置において、格子生成の自由度と計算効率を両立させることを目的とする。

#### 【0008】

##### 【課題を解決するための手段】

上記の課題を解決するために、本発明では、有限体積法により混合格子型解適合格子法を用いて数値解析を行う数値解析装置を、四面体セルと六面体セルと五面体セルの自由な組み合わせを用いて作成された初期格子データを格納する初期格子記憶手段と、セルの三角形の面を複数の三角形に、四角形の面を複数の四角形に分割するように、セルを複数のセルに分割する格子分割手段と、セルを削除して分割前のセルに戻す格子削除手段とを具備する構成とした。このように構成したことにより、格子形成の自由度が高く、さらに計算効率がよくなる。

#### 【0009】

##### 【発明の実施の形態】

以下、本発明の実施の形態について、図1～図12を参照しながら詳細に説明する。

#### 【0010】

##### (第1の実施の形態)

本発明の第1の実施の形態は、四面体セルと六面体セルと五面体セルとを用い、分割削除の指針値が分割閾値よりも大きければ、セルの三角形の面を複数の三角形に、四角形の面を複数の四角形に分割するように、セルを複数のセルに分割し、分割削除の指針値が削除閾値よりも小さければ、セルを削除して分割前のセルに戻す方法により、衝撃波管問題を解析する数値解析装置である。

#### 【0011】

図1は、本発明の第1の実施の形態における数値解析装置の機能ブロック図である。図1において、入力装置1は、初期格子データと分割閾値データと削除閾値データと物理量などの各種データやパラメータを入力する手段である。初期格子メモリ2は、格子の初期値を格納するメモリである。分割閾値メモリ3は、格子分割の判定基準を保持するメモリである。削除閾値メモリ4は、格子削除の判定基準を保持するメモリである。有限体積法演算装置5は、有限体積法により数値解析を行う手段である。格子分割手段6は、格子のセルを分割する手段である。格子削除手段7は、格子を削除しセルを合併してもとのサイズのセルに戻す手段である。指針値計算手段8は、密度などの物理量をもとに指針値を計算する手段である。分割判定手段9は、分割閾値と指針値を比較する手段である。削除判

定手段 10 は、削除閾値と指針値を比較する手段である。表示装置 11 は、数値解析の結果を表示する手段である。図 2 は、数値解析装置の動作手順を示す流れ図である。

#### 【0012】

図 3 は、本発明の第 1 の実施の形態における数値解析装置で用いる格子の分割方法を示す図である。図 3 (a) は、四面体（三角錐）の 8 分割法を示す図である。図 3 (b) は、六面体の 8 分割法を示す図である。図 3 (c) は、三角柱（プリズムとその変形を含む）セルの 8 分割法を示す図である。図 3 (d) は、四角錐（ピラミッド）セルを、6 つの四角錐と 4 つの四面体に分割する 10 分割法を示す図である。図 3 (e) は、四面体（三角錐）の 8 分割法と 6 分割法を示す図である。

#### 【0013】

図 4 は、格子境界面を分割する方法を示す図である。図 4 (a) は、三角形の面を分割する方法を示す図である。図 4 (b) は、四角形の面を分割する方法を示す図である。図 4 (c) は、二次元におけるレベル差 0 のセルを分割する方法と、レベル差 1 のセルを削除する方法を示す図である。図 4 (d) は、二次元におけるレベル差 1 のセルを分割する方法と、レベル差 0 のセルを削除する方法を示す図である。図 4 (e) は、二次元における中間節点と遷移格子の説明図である。

#### 【0014】

図 6 は、本発明の第 1 の実施の形態における数値解析装置で解析対象とする衝撃波管中を衝撃波が進行する状態を示す模式図と、四角錐で格子を構成した衝撃波管中を衝撃波が進行する状態を解析した結果を示す図である。図 7 は、四面体と四角錐と六面体で格子を構成した衝撃波管中を衝撃波が進行する状態を解析した結果を示す図である。図 8 は、四面体と三角柱と四角錐と六面体で格子を構成した衝撃波管中を衝撃波が進行する状態を解析した結果を示す図である。

#### 【0015】

上記のように構成された本発明の第 1 の実施の形態における数値解析装置の動作を説明する。最初に、図 1 を参照しながら、数値解析装置の動作の概要を説明する。数値解析装置の基本的な構成は、従来の装置と同じである。入力装置 1 から、初期格子データと分割閾値データと削除閾値データと物理量などの各種データやパラメータを入力する。格子の初期値は、初期格子メモリ 2 に格納しておく。格子分割の判定基準を、分割閾値メモリ 3 に保持しておく。格子削除の判定基準を、削除閾値メモリ 4 に保持しておく。これらのデータに基づいて、有限体積法演算装置 5 で、有限体積法により数値解析を行う。

#### 【0016】

指針値計算手段 8 で、密度などの物理量をもとに指針値を計算する。分割判定手段 9 で、分割閾値と指針値を比較する。削除判定手段 10 で、削除閾値と指針値を比較する。指針値が分割閾値以上であれば、格子分割手段 6 で、格子のセルを

分割する。指針値が削除閾値以下であれば、格子削除手段 7 で、格子を削除しセルを合併してもとのサイズのセルに戻す。これを繰り返して、数値解析を進める。数値解析の結果を、表示装置 11 に表示する。

#### 【0017】

図 2 を参照しながら、数値解析装置の動作手順の概要を説明する。ステップ 1 で、有限体積法演算装置 5 は、初期格子メモリ 2 から初期格子データを読み込む。ステップ 2 で、有限体積法による計算を実行する。時間単位は 1 つでもよく、複数でもよい。ステップ 3 で、すべての時間単位計算が終了したか进行检查する。終了していれば、ステップ 4 で、結果を表示して処理を終了する。終了していなければ、ステップ 5 で、指針値を計算する。

#### 【0018】

ステップ 6 で、指針値と分割閾値を比較し、指針値が分割閾値以上であれば、ステップ 7 でセルを分割する。指針値を削除閾値と比較し、指針値が削除閾値以下であれば、ステップ 8 でセルを削除する。指針値が分割閾値と削除閾値の間であれば、分割も削除もしない。比較と分割と削除の処理を、格子を構成するすべてのセルについて行う。その後、格子データを更新して、ステップ 2 に戻り、有限体積法による計算を実行する。

#### 【0019】

数値解析装置の動作の詳細を説明する。格子を細分化する h 法を、Hybrid 格子に適用する。すなわち、Hybrid Grid Adaptation (以下 HGA と略記) 法を採用する。HGA 法の手順は、大きく分けると以下のようになる。

- (1) 分割・削除の指針値の計算
- (2) セルの分割
- (3) セルの削除

である。以下、これらの各手順について詳しく説明する。

#### 【0020】

指針値の計算について説明する。分割・削除を行うセルを判断する前段階として、セルごとに指針値を計算する。計算結果の指針値が分割閾値よりも大きければ、セルを分割する。指針値が削除閾値よりも小さければ、セルを削除する。指針値が削除閾値と分割閾値の間であれば、セルをそのままにする。予め最大分割レベルを設定しておき、各セルの分割レベルが最大の場合は分割しない。さらに、セルの体積が最小セル体積よりも小さい場合は、分割レベルが最大でなくとも、分割は行わない。セルの体積による制御を加えることで、物体周りのセルが必要以上に細かく分割されるのを防ぐことができる。逆に、分割レベルが 0 (初期セル) の場合、削除は行わない。衝撃波や接触不連続面を探知するために、指針値には密度を用いる。また、指針値の計算には、M. Delanaye の方法を用いる。ただし、この部分は、分割削除のマーキングを行うだけなので、他の指針値を利用することも可能である。

#### 【0021】

図 3 と図 4 を参照しながら、格子を構成するセルを分割する方法を説明する。

本発明では、格子形状自由度の大きい四面体格子（四面体セルからなる格子）と、計算効率の良い六面体格子（六面体セルからなる格子）を混合して用いる。すなわち、初期格子を生成する場合に、境界面が平面などで形状の制約の無い部分には六面体格子を用い、境界面が曲面などの複雑な形状であれば四面体格子を用いる。このようにすることにより、格子形状への適応の自由度の高さと計算効率の高さを両立させることができる。しかし、四面体格子の境界面の形状は三角形であり、六面体格子の境界面の形状は四角形であるため、両者を単純につなぐことはできない。そこで、両者の境界面の間に、三角形と四角形の両方の面を持つ五面体セル（四角錐（Pyramid）と三角柱（Prism））を用いて、両者をつなぐ。

#### 【0022】

セルの分割方法には様々な方法があるが、本発明では、図3に示すように分割する。図3(a)は、四面体を、単純に8個の四面体に分割する方法である。図3(b)は、六面体を8個の六面体に分割する方法である。図3(c)は、三角柱を8個の三角柱に分割する方法である。これらは単純な8分割法である。図3(d)は、四角錐を、6個の四角錐と4個の四面体に分割する方法である。図3(e)は、四面体を、8個の四面体に分割する方法と、4個の四面体と2個の四角錐に分割する方法の2種類があることを示す図である。8分割法では、4回分割を繰り返すと、1個のセルが4096個のセルになる。6分割法では、4回分割を繰

り返すと、1個のセルが2448個のセルになる。2種類の分割方法のうち、問題に適した方を選択することが可能である。

#### 【0023】

このように分割することで、格子境界面において、三角形の面は、図4(a)に示すように、4つの三角形に分割される。四角形の面は、図4(b)に示すように、4つの四角形に分割される。こうすることで、格子の境界面の取扱いがある程度容易になり、プログラムの複雑化を防ぐことができる。

#### 【0024】

ところで、解適合格子法を用いると、分割(削除)されたセルと、その隣接セルとの間に、中間節点(図4(e)に白抜きで示す節点)が生成される。この節点があると計算が行われないために、この節点を一時的に埋めるセルが必要になる。これを遷移格子(図4(e)に網掛けで示す部分のセル)と呼ぶ。しかし、この遷移格子は、形が歪みやすいために、計算が不安定になったり、プログラムが複雑になったりするといった問題が生じる。そこで、有限体積法をベースにした計算手法を用いて、この困難を回避する。境界面数を調節することにより、流束を評価して計算を行うことができるため、遷移格子を用いる必要がなく、これらの問題を解消することができる。

#### 【0025】

図5(a)を参照しながら、セルの分割処理の手順を具体的に説明する。セルの分割を行う前に、注目セルと隣接セル（面か辺か節点を共有するセル）の情報に基づいて、セルの再マーキングを行う。この作業は、注目セルと隣接セルの分

割レベルの差が1以内に抑えられるようになるまで、再帰的に繰り返される。つまり、セルの1つの辺上に中間節点は1個までしか取れないようになっている。その後、各格子形状に応じた分割処理を実行する。

#### 【0026】

ステップ11で、データの移動及びメモリの確保を行う。分割する前のセル情報を、仮親のセル（一時メモリ）に移す。そして、新たにできる節点、セルのメモリを確保する。ステップ12で、新たにできたセルの情報の設定を行う。分割によ

って新たにできたセルを構成する節点のメモリと、隣接するセルのメモリを設定し、物理量を与える。物理量の与え方は、分割する以前のセルの物理量をそのまま与える。さらに、家族関係を決める。分かり易くするために、図4（f）を参照しながら、二次元で説明する（三角形格子）。分割以前のセルと形状が同じセルの一つを親セルとする。例えば、図4（f）の中央の図形の左下の三角形を親セルとする。親セルとなったセルの親セルは、そのセル自身である。兄弟セルは、分割によって一緒に生成されたセルであり、セルは兄弟セル1つを記憶している。家族関係のデータは、1次元配列で表現され、分割レベルごとに設定される。親や兄弟が存在しない場合は、配列の値として0が入る。

#### 【0027】

ステップ13で、分割する以前のセルに隣接していたセルの情報を修正する。隣接セルの節点、その隣接セル、セル境界面数のデータを修正する。隣接セルとの分割レベル差が0の時（図4（c）に示す状態のとき）には、セルの節点データ、隣接セルのデータ、セル境界面数のデータを修正する。レベル差が1のとき（図4（d）に示す状態のとき）には、隣接セルのデータのみを修正する。また、それぞれのセル形状に対応した関数が実行される。ステップ14で、節点を共有するセルデータの設定と修正を行う。セルの分割により新たに生成された節点と既存の節点との節点共有セルのデータを設定、修正する。ステップ15で、分割する以前のセルと辺を共有するセルのデータを修正する。節点を共有するセルを検索し、新たにできた節点をセル情報に追加し、セルデータを修正する。ステップ16で、仮親のメモリの解放を行う。

#### 【0028】

図5（b）を参照しながら、セルの削除について説明する。セルの削除の方法については、分割の逆を行い、セルの削除は、親セルとその全ての兄弟のセルの分割レベルが同じであり、親セルとその全ての兄弟のセルに削除マークがついているという条件を満たす場合に実行される。ステップ21で、仮親のメモリの確保とデータの移動を行う。削除以前の親セルの情報を仮親のセルに移す。ステップ



22 で、削除後のセル情報の設定を行う。削除後のセルのセルデータと、隣接セル

のセルデータを設定する。また、

$$q = \{\sum_{i=1}^N q_i' V_i\} / \{\sum_{i=1}^N V_i\}$$

という式を用いて、削除後のセルに物理量を与える。ここで、 $q'$  は、削除前のセルの物理量、 $V$  は、削除前のセル体積、 $N$  は削除され 1 個のセルになるセルの数である。原則的には、 $N=8$  である。ただし、図 3 (d)、(e) の時は、それぞれ 10、6 となる。

#### 【0029】

ステップ 23 で、削除される以前のセルに隣接していたセルの情報を修正する。隣接セルとのレベル差が 1 のとき (図 4 (d) に示す状態のとき) には、セルデータ、隣接セルデータ、セル境界面数データを修正する。レベル差が 0 のとき (図 4 (c) に示す状態のとき) には、隣接セルデータのみを修正する。ステップ 24 で、節点で隣接するセルデータの修正を行う。セルが削除されるのに伴い、節点の隣接セルデータを修正する。ステップ 25 で、削除される以前のセルと辺を共有する

セルのセルデータを修正する。節点を共有するセルを検索し、レベル差を考慮して、その節点を削除するかを決定し、セルデータを修正する。節点を削除した場合は、その節点のメモリを解放する。ステップ 26 で、仮親のメモリの解放と、削除されたセルのメモリの解放を行う。

#### 【0030】

セル分割により新たに生じるセルと節点の配列番号の取り方を説明する。分割によって新たに生じるセルと節点の配列番号の取り方としては、以前の削除によってフリーとなっている配列番号を使い回してやれば、最小限の配列番号で済む。しかし、フリーとなった配列番号の検索には莫大な時間がかかる。そこで、使用する計算機が許す限り大きく配列番号を取っておく。分割により新たに必要となる配列は、新しい番号をどんどん使っていく。最大配列番号まで使い切ったら、配列番号の使い回しを行う。こうすることで、最大配列番号を使う状態に至るまでは非常に速く HGA 法を実行できる。

#### 【0031】

図 6 と図 7 と図 8 を参照しながら、衝撃波管中を衝撃波が進行する状態を解析する例を説明する。図 6 (a) に、衝撃波管中を衝撃波が進行する直前の初期状態を示す。断面が矩形の直管の長手方向を  $x$  軸とする。断面の上下方向を  $z$  軸とし、左右方向を  $y$  軸とする。 $x:0.0\sim1.0$  の領域には、高圧で高密度の流体がある。

密度は 1.0、速度は 0、圧力は 1.0 である。 $x:1.0\sim2.0$  には、低圧で低密度

の流体がある。密度は 0.125、速度は 0、圧力は 0.1 である。

#### 【0032】

図6 (b) に、衝撃波管中を衝撃波が  $x : 1.50$  に進行した状態（無次元時間  $t = 0.28$  の状態）を、五面体（四角錐）で格子を構成して解析した結果を示す。速度と密度と圧力の各々の分布が示してある。実線は厳密解である。図6 (c) と (d) は、そのときの格子の状態を示す図である。分割閾値は  $0.15$  であり、削除閾値は  $0.10$  である。最大分割レベルは  $3$  である。セル数は  $18656$  個で、節点数は  $7475$  個である。

#### 【0033】

図7 (a) に、直管中を衝撃波が  $x : 1.50$  まで進行した状態を解析した結果を示す。図7 (b) と (d) は、そのときの格子の状態を示す図である。初期格子を、図7 (c) に示すように四面体と四角錐と六面体で構成した。分割閾値は  $0.10$  であり、削除閾値は  $0.05$  である。最大分割レベルは  $3$  である。セル数は  $25215$  個で、節点数は  $11266$  個である。

#### 【0034】

図8 (a) に、直管中を衝撃波が  $x : 1.50$  まで進行した状態を解析した結果を示す。図8 (b) と (d) は、そのときの格子の状態を示す図である。初期格子を、図8 (c) に示すように四面体と三角柱と四角錐と六面体で構成した。分割閾値は  $0.10$  であり、削除閾値は  $0.08$  である。最大分割レベルは  $3$  である。セル数は  $20679$  個で、節点数は  $9083$  個である。

#### 【0035】

上記のように、本発明の第1の実施の形態では、衝撃波管中を進行する衝撃波を解析する数値解析装置を、四面体セルと六面体セルと五面体セルとを用い、分割削除の指針値が分割閾値よりも大きければ、セルの三角形の面を複数の三角形に、四角形の面を複数の四角形に分割するように、セルを複数のセルに分割し、分割削除の指針値が削除閾値よりも小さければ、セルを削除して分割前のセルに戻す構成としたので、格子形成の自由度と計算効率を両立させることができる。

#### 【0036】

(第2の実施の形態)

本発明の第2の実施の形態は、円柱周りの非定常衝撃波を解析する数値解析装置である。本発明の第2の実施の形態における数値解析装置の基本的な構成は第1の実施の形態と同じである。

#### 【0037】

図9 (a) は、円柱周りの非定常衝撃波を解析するための初期格子を示す図である。円柱の周りは三角柱のセルで格子を形成している。その外側は六面体のセ

ルで格子を形成している。図 9 (b) は、衝撃波が円柱に向かって進んでいる状態を示す模式図である。初期格子のセルの数は 1004 個である。初期格子の節点の数は 1794 個である。Courant 数は 0.2 である。Mach 数は、2.81 である。HGA 周期は、10 ステップごとである。分割閾値は 0.25 である。削除閾値は 0.23 である。最大分割レベルは 3 である。

#### 【0038】

図 10 (a) は、解析結果の等密度線の図である。図 10 (b) は、解析格子の分割状態を示す図である。117729 個のセルに分割されている。図 10 (c) は、実験結果を示す図である。図 10 (d) は、HGA なしの場合の解析結果の等密度線の図である。図 11 (a) は、衝撃波 3 重点の説明図である。図 11 (b) は、衝撃波 3 重点の軌跡を示す図である。

#### 【0039】

図 10 (a) に示す解析結果は、図 10 (c) に示す実験結果とよく一致している。図 10 (b) に示すように、密度の変化の大きいところは、格子が細かくなっている。図 10 (a) と図 10 (d) を比較すると、HGA の効果が大きいことがわかる。図 11 (a) に示す 3 重点（進行する衝撃波面と反射した衝撃波面とマッハステムが交わる点）の軌跡を、実験結果と比較すると、図 11 (b) に示すように、かなりよく一致している。

#### 【0040】

上記のように、本発明の第 2 の実施の形態では、円柱周りの非定常衝撃波を解析する数値解析装置を、六面体格子と五面体格子とを用い、分割削除指針値が分割閾値よりも大きければ、セルの三角形の面を複数の三角形に分割し、四角形の面を複数の四角形に分割するように、セルを複数のセルに分割し、分割削除指針値が削除閾値よりも小さければ、セルを削除して分割前のセルに戻す構成としたので、格子形成の自由度と計算効率を両立させて、円柱周りの非定常衝撃波を解析することができる。

#### 【0041】

(第 3 の実施の形態)

本発明の第 3 の実施の形態は、1/8 球周りの非定常衝撃波を解析する数値解析装置である。本発明の第 3 の実施の形態における数値解析装置の基本的な構成

は第1の実施の形態と同じである。

#### 【0042】

図12(a)は、衝撃波が1/8球に向かって進んでいる状態を示す模式図である。図12(b)は、本発明の第3の実施の形態における数値解析装置で用いる、1/8球周りの非定常衝撃波を解析するための初期格子を示す図である。6642個の四面体と1465個の節点からなる格子である。Courant数は0.2である。Mach数は2.00である。HGA周期は、10ステップごとである。分割閾値は、0.3である。削除閾値は、0.25である。セルの最大分割レベルは3である。セルの最小体積は $3.5 \times 10^{-7}$ である。1つの四面体を8個の四面体に分割する(タイプ1)。または、1つの四面体を、4個の四面体と2個の四角錐に分割する(タイプ2)。図12(c)は、タイプ1の解析結果の等密度線図であり、559243個のセルに分割され、133286個の節点ができる。タイプ2では、409969個のセルに分割され、141368個の節点ができる。タイプ2の解析結果の等密度線図は、図12(c)とほぼ同じである。つまり、Hybrid格子を用いて計算を行うことにより、低容量のメモリで解析することができる。

#### 【0043】

上記のように、本発明の第3の実施の形態では、1/8球周りの非定常衝撃波を解析する数値解析装置を、タイプ1は四面体格子、タイプ2は四面体格子とピラミッド格子を用い、分割削除指針値が分割閾値よりも大きければ、セルの三角形の面を複数の三角形に分割し、四角形の面を複数の四角形に分割するように、セルを複数のセルに分割し、分割削除指針値が削除閾値よりも小さければ、セルを削除して分割前のセルに戻す構成としたので、格子形成の自由度と計算効率を両立させて、1/8球周りの非定常衝撃波を解析することができる。

#### 【0044】

##### 【発明の効果】

以上の説明から明らかなように、本発明では、数値解析装置を、四面体セルと六面体セルと五面体セルの自由な組み合わせを用いて初期格子を形成し、セルの三角形の面を複数の三角形に、四角形の面を複数の四角形に分割するように、セルを複数のセルに分割し、有限体積法により混合格子型解適合格子法を用いて数値解析を行う構成としたので、格子形成の自由度が高く、さらに計算効率がよくなるという効果が得られる。

##### 【図面の簡単な説明】

【図 1】

本発明の第 1 の実施の形態における数値解析装置の機能ブロック図、

【図 2】

本発明の第 1 の実施の形態における数値解析装置の動作手順を示す流れ図、

【図 3】

本発明の第 1 の実施の形態における数値解析装置で利用するセルの分割方法を示す図、

【図 4】

本発明の第 1 の実施の形態における数値解析装置で利用する格子境界面を分割する方法を示す図、

【図 5】

本発明の第 1 の実施の形態における数値解析装置の分割手順と削除手順を示す流れ図、

【図 6】

本発明の第 1 の実施の形態における数値解析装置で、四角錐で格子を構成した衝撃波管中を衝撃波が進行する状態を解析した結果を示す図、

【図 7】

本発明の第 1 の実施の形態における数値解析装置で、四面体と四角錐と六面体で格子を構成した衝撃波管中を衝撃波が進行する状態を解析した結果を示す図、

【図 8】

本発明の第 1 の実施の形態における数値解析装置で、四面体と三角柱と四角錐と六面体で格子を構成した衝撃波管中を衝撃波が進行する状態を解析した結果を示す図、

【図 9】

本発明の第 2 の実施の形態における数値解析装置で、円柱周りの非定常衝撃波を解析するための初期格子と、衝撃波が円柱に向かって進んでいる状態を示す模式図、

【図 10】

本発明の第 2 の実施の形態における数値解析装置で、等密度線、解析格子の分割状態を示す図、実験結果を示す図、HGA なしの場合の等密度線、

【図 11】

本発明の第 2 の実施の形態における数値解析装置で、衝撃波 3 重点の説明図と、衝撃波 3 重点の軌跡を示す図、

【図 12】

本発明の第 3 の実施の形態における数値解析装置で、1 / 8 球周りの非定常衝撃波を解析する方法を説明する図である。

【符号の説明】

- 1 入力装置
- 2 初期格子メモリ
- 3 分割閾値メモリ
- 4 削除閾値メモリ

- 5 有限体積法演算装置
- 6 格子分割手段
- 7 格子削除手段
- 8 指針値計算手段
- 9 分割判定手段
- 10 削除判定手段
- 11 表示装置

【書類名】 図面

【図1】



【図2】



【図3】



【図4】



【図5】



【図6】



【図7】



【図8】



【図9】



【図 1 0】



【図 1 1】



【図 1 2】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 混合格子型解適合格子法を用いる数値解析装置において、格子の自由度と計算効率を両立させる。

【解決手段】 有限体積法により数値解析を行う数値解析装置において、四面体セルと六面体セルと五面体セルの自由な組み合わせを用いて作成した初期格子データを用いる。セルごとに密度に基づいて分割削除の指針値を計算する。セルの体積が最小値よりも大きくて、セルの分割レベルが最大でなくて、分割削除の指針値が分割閾値よりも大きければ、セルの三角形の面を複数の三角形に、四角形の面を複数の四角形に分割するように、セルを分割する。セルの分割レベルが零の初期格子でなくて、分割削除の指針値が削除閾値よりも小さければ、セルを削除併合して分割前のセルに戻す。

【選択図】 図 1